老年人汉语阅读中预测误差成本的产生机制*

李琳　赵赛男　张俐娟　王敬欣

(教育部人文社会科学重点研究基地天津师范大学心理与行为研究院，天津师范大学心理学部，国民心理健康评估与促进协同创新中心，天津 300387)

摘　要 阅读的认知加工机制随年龄变老只发生了量变还是也产生了质变，是毕生发展研究领域的重要问题。要进行有效的语言处理，读者必须结合已有的经验知识和当前语境对即将出现的信息进行预测加工。因此，要解决上述问题就要回答老年人阅读中预测加工机制发生了怎样变化，即预测误差成本是如何产生的。研究拟采用眼动脑电同步记录技术，在自然阅读过程中实时获取语言处理的行为和神经指标，聚焦老年人预测误差成本的产生机制，主要从副中央凹视觉、工作记忆负荷及语言能力三方面解释预测误差成本产生的原因。研究成果对构建汉语阅读的毕生发展模型有重要意义。

关键词 语境效应，预测误差成本，汉语阅读，认知老化，眼动脑电同步记录

1 问题提出

2019 年末，我国 60 岁以上的老年人口数量已超过 2.5 亿，我国即将进入快速老龄化阶段(国家统计局, 2020)。人类发展的传统观念将教育和学习放在生命前端以建立知识库和提升能力。然而，随着寿命的延长和人口结构老龄化，保持信息更新和学习能力对维持整个生命周期的活力愈发重要。阅读是人类学习和获取信息的主要渠道，但阅读能力的发展研究主要集中于早期发展阶段，对老年期阅读行为的变化及其潜在认知机制的关注则严重不足。也就是说，随着年龄变老，阅读的认知加工究竟只是产生了量变还是存在质变这一关键问题尚未解决。

当前有关阅读老化的研究表明，老年人(60 岁以上)的阅读速度比青年人(18~30 岁)慢，在阅读过程中有更多、更长的注视和更频繁的回视(Kliegl et al., 2004; Rayner et al., 2006; Stine-Morrow et al., 2010; Warrington et al., 2019; Whitford & Titone, 2017)。汉语阅读研究进一步得出，为适应汉字文本密集、词边界不明显的特点，老年人发展出更谨慎的眼动策略，表现为更少的跳读和更短的向前眼跳(王敬欣等, 2020; Li et al., 2019; Li et al., 2018; Wang, Li, Li, Xie, Chang et al., 2018; Wang, Li, Li, Xie, Liversedge, & Paterson, 2018; Zang et al., 2016; Zhao et al., 2021; Zhao et al., 2019)。目前，阅读领域的主流眼动计算模型——E-Z 读者模型

收稿日期：2021-3-10

* 国家自然科学基金（32000790）资助；

通讯作者：李琳，linpsy@outlook.com

和 SWIFT 模型都通过改变参数对阅读老化进行了模拟，但是他们进行模拟时所依据的实证研究数据对“随着年龄变老，阅读的认知加工发生了量变还是质变”这一问题的看法是不同的。Kliegl 等人(2004)的研究发现，尽管总体来说老年人比青年人有更长的注视时间，但并没有发现年龄与词频的交互作用，即老年人和青年人表现出了类似的词汇加工模式，只是老年人的加工速度整体变慢，表现出的是一种量变。Laubrock 等(2006)的研究基于 SWIFT 模型对该研究的结果进行了模拟。而 Rayner 等(2006)则发现，在跳读和注视时间等指标上都存在年龄和词频的交互作用，老年人和青年人表现出不同的词汇加工模式，老年人存在更大的词频效应，加工低频词时存在特殊困难，更依赖上文信息在阅读中进行预测加工，以弥补缓慢的词汇加工过程，表现为一种质变。并且该研究还通过修改 E-Z 读者模型的参数对这种老化效应进行了成功模拟。后续的多项研究也得到了类似的年龄与词频的交互作用(刘志方等, 2019; McGowan & Reichle, 2018; Rayner et al., 2013; Wang, Li, Li, Xie, Chang et al., 2018; Wang, Li, Li, Xie, Liversedge, & Paterson, 2018; Whitford & Titone, 2017; Zang et al., 2016)。要解决这一争议，不能仅考虑基础的词汇加工，更要从阅读研究的基本取向入手。阅读的交互加工取向认为，读者将自己的经验知识结合当前语境对即将出现的信息进行预测和提前激活，这是有效语言加工中极其重要的部分(白学军, 闫国利, 2017)。最新提出的汉语阅读眼动控制模型(Chinese reading model, CRM)虽然尚未模拟老化效应，但是也将预测性作为重要的参数纳入了模型(Li & Pollatsek, 2020)。因此，考察随着年龄变老，阅读的认知加工究竟只是产生了量变还是存在质变，问题核心在于老年人的阅读预测加工机制产生的变化。要考察阅读预测加工机制变化的焦点，就要着重考察老年人在阅读中是否存在预测误差成本及其影响因素。

当前研究拟采用眼动脑电同步记录技术，聚焦老年人预测误差成本的产生机制，从副中央凹视觉加工、工作记忆负荷及语言能力三方面考察老年人的阅读加工机制产生动态变化的原因。研究老年人汉语阅读中的预测加工变化，对深入理解汉语加工的认知机制、构建汉语阅读能力的毕生发展模型具有重要意义；更能针对老年人提出有效调节措施，促进老年人的健康管理、工作和继续教育，积极应对老龄化。

2 研究现状

2.1 阅读预测加工

预测加工是大脑的基本工作方式，通过预测编码、计算预测误差来进行正确的信息推断(Clark, 2013; Schuster et al., 2021)。近年来，句子理解的观点一直在向更广泛地接受语言的“预加工”转变，即整个阅读过程是基于不断预测达成的读者与文本的交互对话过程(Willems et al., 2016)。

“完形概率”是测量阅读材料中目标词预测性的主要方式 (Taylor, 1953; Zhao et al., 2021; Zhao et al., 2019)。读者进行完形填空任务，根据目标词前面的句子内容给出最先想到的词，给出目标词的读者占所有读者的比例即为该词的完形概率。语境是决定词汇预测性的关键因素(Balota et al., 1985)。语境给出的信息越详细、限制性越强(限制性语境)，读者越有

可能做出强有力的预测；但如果语境给出的信息模糊(非限制性语境)，读者做出的预测就会较弱且随机。阅读的眼动研究发现了预测性效应(predictability effect)，即读者对高预测词的注视时间比对低预测词更短，且更容易跳读(Balota et al., 1985; Ehrlich & Rayner, 1981; Rayner & Well, 1996; Staub, 2015; Zhao et al., 2021; Zhao et al., 2019)；阅读的电生理研究也发现，随着预测性的降低，N400 波幅增大(Kretzschmar et al., 2015)，对低预测词的加工更困难。

预测性效应的产生原因目前主要有两种理论：第一种理论认为预测性效应来源于对词汇形成“全或无的激活”，又称词汇预测(lexical prediction)。如果产生正确预测会促进词汇加工，如果预测不正确则会对词汇加工产生干扰(即出现预测误差成本)(Luke & Christianson, 2016)。另一种理论认为预测性效应来源于对即将出现的词汇的扩散预激活，读者可能同时激活一系列相关词，这些词的激活程度与其完形概率成正比(Frisson et al., 2017)，最终谁胜出依赖于读者的目标、先验知识和自下而上的信息输入(Kuperberg & Jaeger, 2016)，是一种“等级扩散激活”(graded prediction)。要判断读者采用了哪种预测加工，关键在于考察是否存在预测误差成本(prediction error cost)，也就是说如果目标词预测错误，在看到实际出现的目标词时是否需要付出更大的加工成本。例如，在限制性语境“今天是程亮的生日，他的妈妈给他买了一个____”中，可预测的目标词为“蛋糕”，不可预测的目标词为“手机”。在非限制性语境“令程亮没有想到的是，他的妈妈给她买了一个____”中，对应的不可预测目标词也是“手机”。如果读者采用的是“全或无的激活”，那么在限制性语境下只能激活“蛋糕”，如果看到“手机”作为目标词，就会产生干扰，在限制性语境中的“手机”加工就要比在非限制性语境中的“手机”更困难，产生预测误差成本。而如果读者采用的是“等级扩散激活”，在限制性语境下就会激活“蛋糕”“手机”等一系列可以作为生日礼物的目标词，只是激活强度不同，如果看到“手机”作为目标词，就不会产生更大的干扰，限制和非限制语境中的“手机”加工就不会有显著差异，不存在预测误差成本。也就是说，如果发现老年人存在预测误差成本而青年人不存在的证据(在眼动的注视时间、跳读率、回视比率和注视点个数上和脑电 N400 成分的平均振幅、峰值和潜伏期等指标上)，则认为老年人采用了不同于青年人的预测加工方式，阅读认知加工产生了质变；而如果没有发现老年人和青年人在预测误差成本上有什么差异，则认为老年人的阅读认知加工只是产生了量变。

拼音文字研究发现，青年被试在限制性语境中，对低预测词的加工并不会比对非限制性语境中该词的加工速度慢，即不存在预测误差成本。这说明青年人采用的是等级扩散激活，而非全或无的词汇预测。相较于全或无的词汇预测，等级扩散激活是一种更有效的激活方式(Frisson et al., 2017)。汉语作为一种与拼音语言不同的符号文字系统，在视觉和词汇加工方面对读者有着特殊要求，但汉语也有和其他语言共通的认知神经机制。尤其是在预测加工方面，汉语研究得到了与拼音文字一致的预测性效应(白学军等, 2011; 白学军等, 2015; 苏衡等, 2016; Li & Pollatsek, 2020; Rayner et al., 2005; Yao et al., 2021)，表明在高水平的阅读信息加工层面上存在跨语言的普遍机制。但是汉语阅读中是否存在预测误差成本，还需要更直接的

实证研究证据。

2.2 预测加工与老化

E-Z 读者模型认为老年人会更大程度地依赖上文信息对即将出现的词汇进行预测。然而，目前有关阅读中预测加工老化效应的实证研究数量有限且结论不一致。一些采用眼动技术的研究考察了老年人和青年人的预测加工，发现老年人比青年人存在更大的预测性效应，老年人在加工低预测词时所需时间更长，表明他们更依赖上文信息做出预测(刘志方等，2019; Choi et al., 2017; Huettig & Janse, 2016; Zhao et al., 2021)。另一些采用事件相关电位技术进行的研究则发现老年人比青年人表现出了延迟且更小的预测性效应，认为老年人在阅读中对预测加工的依赖降低(Federmeier & Kutas, 2019; Payne & Federmeier, 2018)。虽然眼动和事件相关电位研究得到的结果表现形式不同，但两种方法都发现老年人和青年人确实存在不同的预测性效应，这提示老年人的预测加工机制可能发生了质变。

前文语境究竟能更好地促进老年人加工高预测词汇，还是会阻碍老年人加工低预测词汇？现有研究不管是眼动还是事件相关电位都仅采用了限制性语境，尚无法回答这个问题。要解决上述问题，一方面需要在限制性和非限制性语境下，考察老年人和青年人是否会产生不同的预测误差成本，另一方面要得到更有说服力的结果需要采用更精确也更具有生态效度的眼动脑电同步记录进行考察。

2.3 影响老年预测加工的因素

在阅读过程中，读者不仅能够看到当前正在注视的词，还能对即将出现的信息进行副中央凹预视加工。读者对文本信息进行加工的过程就是不断将已经加工的信息和即将出现的视觉信息进行整合。因此，高效的阅读预测加工需要读者有良好的视觉能力、工作记忆能力以及语言能力的协同参与。毕生发展观认为老化不等同于纯粹的衰退，而是在各种能力下降真实存在的前提下，认知机制发生了动态变化。正常老化会带来视觉等生理机能和工作记忆等认知能力的下降，但同时语言能力等晶体智力也能得以保留。吴翰林等(2020)的研究关注语言能力的老化机制，提出非特异性的一般认知能力与特异性的语言能力在共同作用，一般认知能力对青年人和老年人的语言能力组间差异贡献更大。因此探究影响老年人预测加工的因素时必须进行多维考察。

随着年龄增长，即便是健康的老年人，也会出现视觉能力衰退，进而导致边缘视野区信息加工能力的减弱(Li et al., 2019; Owsley, 2016)。这意味着老年人的副中央凹预视加工很有可能也会受到影响。但副中央凹视觉信息有效性是否会影响老年人的预测加工，这一问题尚没有明确答案，目前仅有间接证据证明老年人预视加工受损会影响其眼动策略(Li et al., 2018; Schotter et al., 2015; Schotter et al., 2014)。

除了视觉能力造成的影响，认知能力老化同样是重要的影响因素。在认知老化过程中，流体智力的衰退主要表现为工作记忆能力下降(Janse & Jesse, 2014; Stine-Morrow et al., 2010)；晶体智力的持续增长则表现在语言能力方面(Liu et al., 2019)。认知能力对信息加工的影响同

样是多维和多向的，即成人发展和衰老的两大核心——晚期生活中的心理机能衰退(流体智力)和语言能力的保留或增加(晶体智力)对过程层面的阅读加工有着重要影响(Stine-Morrow et al., 2010)。一方面，流体智力随年龄老化而产生的下降可能会限制阅读加工。与老化相关的理论中，工作记忆衰退理论得到了大量实证研究的支持(何文广, 2017)。有研究发现工作记忆能力和语言的预测加工呈正相关，工作记忆容量下降的个体存储语境信息量小、转换和整合信息的速度也会下降，从而影响预测加工(Janse & Jesse, 2014; Huettig & Janse, 2016)。但值得注意的是新近研究表明汉语阅读的语义整合并不能单纯用工作记忆的下降来解释(Zhu et al., 2019)。另一方面，在成人期习惯性地与文本接触让老年人有更多的文本阅读经验，语言能力和知识得到保留或增加，会在一定程度上缓冲老化所带来的影响(Liu et al., 2019; Salthouse & Timothy, 2012)。语言能力已经被证明与预测加工有关，相关研究对比了高低语言能力的成人，语言能力弱者表现出更差的预测加工(Huettig & Brouwer, 2015)。最新的研究表明，词汇量更高的老年人在语言处理能力上表现得更像青年人，说明词汇量起到了一定的补偿作用(Xu et al., 2020)。

副中央凹预视信息的有效性、工作记忆的负荷量以及语言能力的保持均有可能对老年人和青年人阅读的预测加工机制造成影响，且这些影响可能并不是独立存在的，但目前已有研究尚不能证实三者怎样影响预测误差成本的产生。因此，要考察老年人阅读预测加工机制变化的原因，必须要考虑到视觉能力下降、流体智力如工作记忆和晶体智力如语言能力的影响。除此之外，其他非特异性认知因素也被研究者认为会对语言能力的老化产生影响(吴翰林等, 2020)，例如老年期加工速度降低(Salthouse, 1996)和抑制无关信息的能力下降(Campbell et al., 2020)；老年人的受教育背景以及日常阅读习惯也会影响其语言能力。

2.4 眼动脑电同步记录技术在阅读中的应用

在阅读的电生理研究中大多采用快速系列视觉呈现范式(RSVP)，这种范式为预测加工相关研究提供了很多证据，但也有潜在弱点：刺激的非自然呈现(Frisson et al., 2017; Schotter et al., 2014)。一方面，单词以特定速率呈现的时间通常比正常阅读中加工每个词所需的时间要长得多；另一方面，这种范式让被试采用单向的系列加工方式对文本信息进行加工，无法进行自然阅读过程中存在的预视加工和回视加工。Sereno 和 Rayner(2003)的综述中首次提出可以将眼动追踪与 ERP 技术相结合的方法，在正常阅读情境下同时记录眼动指标和与注视相关的脑电指标(fixation-related brain potentials, FRPs)，当这两种技术联合应用于同样的实验设计时，能同步测量阅读认知加工过程中的眼动行为表现和 EEG 信号。

眼动和脑电信号都具有非常高的时间分辨率，同步记录的关键在于保证眼动和脑电信号的采集具有相同的采样率(一般采用 1000Hz)，这样能够更好地探测出注视时大脑所进行的加工(Baccino, 2011)。同步记录通过两台以并口方式连接的电脑实现，一台电脑(A)负责呈现刺激及收集眼动数据，另一台电脑(B)负责收集脑电数据。实验可以设置在电脑 A 呈现某个刺激的同时向电脑 B 发送同步 TTL 脉冲信号，达到眼动和脑电系统的同步记录。在离线分

析的时候，TTL 脉冲信号为数据的匹配提供了准确的时间标记(离线分析时以注视开始和注视结束的时间点作为脑电数据分段的依据)。但是值得注意的是在脑电记录的过程中本身要排除眼动所带来的眼电干扰，进行眼动脑电同步记录就要进行伪迹矫正。目前认为可行的方法有两种：独立成分分析法(ICA) (Henderson et al., 2013)，先利用 EOG 确定出 ICA 成分，再确定该成分负荷的头皮分布，接下来利用元分析确定出眼球位置电流密度所占比例，最后确定出眼动伪迹成分，并从原始脑电数据中减去眼动伪迹成分。另一种采用多源眼电矫正法(MSEC)(Dimigen et al., 2011)，这种方法需要被试在正式实验前完成四个方向 120 个眼跳校准，同时记录 40 个自主眨眼，然后通过主成分分析(PAC)定义出每种眼动的伪迹地形图，然后再进行矫正(李诸洋, 刘璐, 2017)。

已有采用眼动脑电同步记录的研究发现预测性对两类指标都有明显影响，眼动指标上高预测性词有更多跳读、更少的回视和更短的注视时间，在脑电指标上也呈现出了更小的 N400 波幅(Kretzschmar et al., 2015)。目前，汉语阅读中还没有研究采用这种最新的联合记录手段来考察预测加工，而这种手段能在更自然的阅读实例中考察是否存在预测误差成本这一关键问题。

综上所述：本研究拟采用眼动和脑电同步记录技术，聚焦汉语阅读中与老化相关的高水平信息加工机制，考察老年人和青年人的阅读加工仅存在数量上的差异还是存在质量上的差异，要解决的关键问题聚焦于老年人在阅读中是否存在预测误差成本。针对汉语阅读的预测加工，主要从副中央凹视觉加工、工作记忆负荷以及语言能力三个方面，考察随老化产生的生理机能、流体和晶体智力的变化产生的影响。并且将加工速度、抑制能力、受教育背景和日常阅读习惯等因素作为协变量纳入模型，进行数据挖掘整合，构建汉语阅读毕生发展模型。

3 研究构想

本研究拟采用眼动脑电同步记录技术(FRPs)，考察汉语阅读中预测加工随着年龄老化发生的认知机制变化及其影响因素。要解决的核心科学问题是：在阅读中老年人和青年人表现出的差异仅为数量上的差异还是存在质量上的差异，包括以下三方面：

(1) 在限制性和非限制性语境下，老年人和青年人是否会产生不同的预测误差成本，采用不同的预测加工机制；

(2) 考察副中央凹视觉信息的有效性、工作记忆负荷以及语言能力的保持如何造成老年人和青年人采用了不同的预测加工机制；

(3) 加工速度、抑制能力、受教育背景和日常阅读习惯等影响一般语言能力老化的因素是否会对预测加工机制也产生影响；以上所有因素以何种方式和时间进程在预测加工的不同阶段发挥作用，老年人的个体差异会产生怎样的影响。

本研究围绕上述三个科学问题，拟开展以下三项研究：

研究一，使用眼动和脑电同步记录技术(FRPs)，设置不同的语境限制性条件，以多种眼动指标和脑电成分为因变量，通过考察汉语阅读中老年人和青年人是否出现预测误差成本，

探讨随着年龄老化，阅读中预测加工的认知机制是否发生了质变。

研究二，使用眼动和脑电同步记录技术(FRPs)，设置不同的语境限制性条件，以多种眼动指标和脑电成分为因变量，主要从副中央凹预视、工作记忆、语言能力三方面考察导致老年人出现预测误差成本，即预测加工机制发生变化的原因。同时在所有实验进行前均进行视觉能力(中央凹视敏度测验)、教育背景、近期的阅读经验、加工速度(数字和颜色命名任务)、工作记忆(数字顺背和倒背)、抑制能力(STROOP 任务)、词汇能力(韦氏智力量表词汇分测验)的测试，得到的数据用于研究三的数据挖掘整合，以便全面地考察相关因素可能产生的影响：

实验 1，应用随眼动变化的边界范式，设置不同的副中央凹预视条件，考察在副中央凹视觉信息有效和无效的条件下老年人和青年人的预测误差成本是否存在差异，探讨视觉生理能力对预测加工机制的影响；

实验 2，应用眼动的掩蔽文本范式，考察在正常和加重的工作记忆负荷下老年和青年的预测误差成本是否产生变化，探讨工作记忆整合作用对预测加工机制的影响；

实验 3，根据语言能力将老年人分为高低语言能力组，考察不同语言能力的老年人和青年人的预测误差成本是否存在差异，探讨语言能力的保留对预测加工机制的影响。

研究三，采用线性混合模型，将研究二中涉及的所有因素作为协变量纳入模型进行分析，考察各因素对预测加工模式的影响。进一步对脑电成分和眼动指标进行生存和分布分析，考察上述影响产生的时间进程和个体差异问题。

3.1 研究一：年龄老化对汉语阅读中的预测误差成本产生的影响

阅读时，读者能根据自身的知识经验和上文信息对即将出现的词做出预测，词的可预测性会对文本的动态加工过程产生影响。阅读的眼动研究表明，词在语境中的完形概率可以衡量词的预测性，预测性高的词比预测性低的词得到的注视时间更短，且更有可能被跳读(Staub, 2015)。电生理研究也为预测性有助于文本加工提供了证据，N400 是事件相关电位(ERP)记录的和语义加工相关的负波，在刺激呈现后约 400ms 发生，这种波的波幅在低预测条件下会增大(DeLong, Quante, & Kutas, 2014)。

对于阅读中预测性效应发生的原因，前文已经介绍了等级扩散激活和词汇激活两种对立的理论，这也是对阅读中预测性加工的认知机制进行探讨的关键所在。区分等级扩散激活和词汇激活两种机制的关键在于考察：在限制性语境中遇到一个不可预测的单词，与在非限制性语境中遇到同一个单词相比，是否存在阅读时间成本，即是否存在预测误差成本。如果存在预测误差成本则表明，在高限制性语境中，读者期望某个特定高预测性的目标词出现，如果该词与目标词一致，则促进对目标词的加工，如果不一致则对目标词的加工产生干扰，产生预测误差成本。另一方面，如果不存在预测误差成本，意味着读者进行的不是全或无的预测，不会保持对某一个特定词汇的期望，而是对一系列相关词进行了等级扩散式的激活。拼音文字阅读研究已证明青年人倾向于采用等级扩散的激活模式进行预测加工。基于汉字书写系统本身，汉语阅读表现出一定的独特性，在预测这种高水平的信息加工中可能存在跨语言

的一致性。

老年人在阅读中的预测加工机制与青年人相比是否产生了质变？针对这一问题，首先要考虑的是阅读中的预测性效应是否在老年人身上表现出不同于青年人的模式。采用事件相关电位进行的研究考察了老年人和青年人的预测加工在 ERPs 上的反应差异，发现老年人表现出延迟的以及更小的语境限制性效应，认为老年人在阅读理解中对预测加工的依赖降低(Federmeier & Kutas, 2005; Wlotko & Federmeier, 2012)。另一些采用眼动追踪技术的研究则认为老年人比起青年人在阅读中显示出更大的预测性效应，更加依赖阅读中的预测加工(Choi et al., 2017; Huettig & Janse, 2016)。而根据 E-Z 读者模型的预测，老年人会更大程度地利用上文信息预测即将出现的单词，以弥补其较为缓慢的词汇加工过程(McGowan & Reichle, 2018; Rayner et al., 2006)。在视觉生理机能和认知能力都产生了变化的情况下，老年人可能会采用和青年人不同的预测加工机制。因此通过考察老年人在预测加工上是否出现预测误差成本，可探讨老年人和青年人是否采用了不同的认知加工机制来进行预测加工。

因此，研究一拟采用眼动和脑电同步记录技术(FRPs)，通过设置不同的语境限制性和目标词预测性水平，记录被试在阅读中的眼动轨迹和脑电反应，考察汉语阅读中老年人和青年人是否出现预测误差成本，探讨随着年龄老化阅读中预测加工的认知机制是否发生了质变。实验材料设置如表 1 所示：

表 1 实验条件设置举例

条件	例句	目标词
限制性语境可预测(CP)	今天是程亮的生日，妈妈给他买了一个*蛋糕*作为礼物。	蛋糕
限制性语境不可预测(CU)	今天是程亮的生日，妈妈给他买了一个*手机*作为礼物。	手机
非限制性语境不可预测(对应词 NU)	程亮没有想到的是，妈妈给他买了一个*手机*作为礼物。	手机

青年人和老年人各 60 名参与材料评定，且都不参与后续的眼动研究。限制性语境中，可预测目标词(CP)的平均完形概率为 78.2%，不可预测(CU)的平均完形概率为 1.8%；非限制性语境中不可预测条件下对应词(NU)的平均完形概率为 0.8%。对材料的完形概率进行配对样本 t 检验显示，CP 的完形概率明显高于 CU(p<0.001)。对于能够检验预测误差成本的高低不同限制性下的不可预测目标词，CU 和 NU 的完形概率不存在显著差异(t<1)。可预测和不可预测的目标词的在视觉复杂性和词频上进行严格匹配。两个年龄组的评定之间不存在显著的差异(ts<1)。可预测和不可预测目标词所在的句子框架是相同的。这里要注意的是，(不)可预测目标词的分类是基于限制性语境得到的概念；非限制性语境中对应的不可预测目标词也具有较低的完形概率。

对所有被试进行视觉能力(中央凹视敏度测验)、教育背景、近期阅读经验、加工速度(数字和颜色命名任务)、工作记忆(数字顺背和倒背)、抑制能力(STROOP 任务)、词汇能力(韦氏智力量表词汇分测验)的测试和记录，确保被试组内的同质性。在最后一项研究中会将所有测试分数作为协变量纳入模型进行分析。

假设：(1) 如果当前研究对实验材料的控制是有效的，那么应该观测到典型的预测性效应，表现为在限制性语境下，可预测比不可预测目标词有更短的注视时间和更高的跳读率；(2) 如果汉语阅读中老年人和青年人采用的预测加工机制不同，青年人不会表现出预测误差成本，即一个不可预测目标词不管在限制性语境还是非限制性性语境下，加工时间不存在显著差异；而老年组被试则可能存在预测误差成本，即在限制性语境中出现不可预测目标词会阻碍老年人的加工。

3.2 研究二：视觉生理和认知能力的老化对预测加工机制变化的影响

3.2.1 实验 1：副中央凹视觉信息的有效性对老年人和青年人预测误差成本产生的影响

句子理解是通过预测和预视加工的整合而产生的。要将预测效果与副中央凹预视效果分离开来，需要精细的实验设计和时间分辨率非常高的测量手段(DeLong, Quante, & Kutas, 2014; DeLong, Troyer, & Kutas, 2014; Kutas et al., 2011)。目前在阅读的眼动研究中，考察副中央凹预视加工最常用的是边界范式(Rayner, 1975)。采用这种范式，在目标词之前设置不可见的边界，在边界右侧设置不同的预视条件，当读者的眼睛注视着边界的左侧时，边界右侧呈现(读者副中央凹预视加工)的内容是不同的预视信息；当读者的眼睛越过边界时，这些预视信息就会变为目标词。如，目标词“椅子”可以在预视时被这个词本身(如：椅子)或掩蔽符号(如：##)或不相关的词(如：光芒)掩蔽。Balota 等(1985)最早使用此技术来操纵高低预测性目标词的副中央凹预视，发现只有当预视词与目标词完全相同或视觉上相似时，才会产生与高预测相关的促进效果。后续研究进一步验证了预测性和预视的交互作用。这些研究清晰地展现出：预测性效应的出现依赖于读者能获得有效的副中央凹预视(Juhasz et al., 2008; White et al., 2005)。研究者提出的贝叶斯信念模型对这种现象进行了解释，认为无效预视产生的成本导致了预测性效应的消失。在句子阅读过程中读者对句子的潜在含义保持多个假设，当遇到每个新单词时，就会根据贝叶斯规则更新这些假设，单词的处理时间是所需信念更新量的函数，而无效的预视代表着意想不到的输入，信念会从开始预期的目标上转移出去，这样就会消除目标词的可预测属性(Levy, 2008; Norris, 2006; Parker et al., 2017)。

这种自上而下的预测加工和自下而上的预视加工之间的相互作用会怎样影响老年人的阅读目前还不明确。老年人的副中央凹预视加工能力大大减弱，但是仍然出现了预测性效应，其原因很有可能是因为他们采用了全或无的词汇预测加工方式。那么如果采用实验手段去除两个年龄组的副中央凹视觉信息，就可以考察副中央凹预视信息存在与否对读者预测加工策略的影响。因此，当前实验拟采用边界范式，在第一项研究的材料基础上，设置有效预视(直接呈现目标词作为预视信息)和无效预视(呈现※号做预视信息)两种预视条件，采用眼动脑电

联合记录方法，考察以下问题：(1)副中央凹预视信息的有效性是否会对老年人和青年人的预测性效应产生影响？(2)副中央凹预视信息的有效性是否会对老年人和青年人预测误差成本的产生造成影响？预视设置条件如图 1 所示。

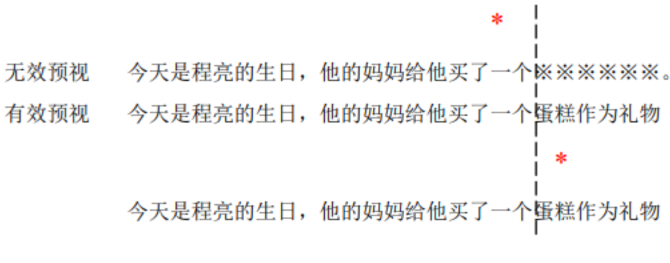


图 1 实验 1 预视条件设置示意图

注：图中*号代表注视点位置，虚线代表不可见边界，当注视点在边界左侧时，被试可能预视到※号(无效预视条件)或蛋糕(有效预视条件)，当注视点越过边界，被试最终注视到的都是目标词蛋糕。

对所有被试进行视觉能力、教育背景、近期阅读经验、加工速度、工作记忆、抑制能力、词汇能力的测试和记录，确保被试组内的同质性。在最后一项研究中会将所有测试分数作为协变量纳入模型进行分析。

假设：(1)如果存在副中央凹预视对预测性加工的影响，在无效预视条件下青年人和老年人会表现出比正常条件下更大的预测性效应的差异，表现为青年人预测性效应更小而老年不变； (2)如果副中央凹预视会导致老年人和青年人不同条件下预测误差成本的变化，青年人在无效预视条件下可能表现出预测误差成本而有效预视条件下没有，老年人则在两种预视条件下均存在预测误差成本。

3.2.2 实验 2：工作记忆负荷对老年人和青年人预测误差成本产生的影响

阅读中读者不仅需要加工不断出现的新信息，而且需要存储已经加工的信息，同时提取已有的信息，并将当前信息与已有信息进行整合。工作记忆作为信息暂时存储和操作的记忆系统，对这一复杂的过程来说非常重要(杨玉芳, 2015)。研究表明，语义信息的加工保持受到工作记忆容量的影响，认知能力不同的个体存储语境信息的容量不同，转换、更新信息的速度也不同，可能会表现出不同程度的预测加工，工作记忆和语言预测加工呈正相关，且工作记忆在时间和空间上构成了语言加工的基础(Huettig & Janse, 2016; Janse & Jesse, 2014)。

有关语言在工作记忆中的保持机制，研究者提出读者需要通过注意焦点的重新锁定来实现记忆痕迹的提取和激活。由于受干扰和随时间流逝产生的衰退的影响，当注意焦点转移时，工作记忆中的相应信息会逐渐消失，在这些信息消失之前，可以通过注意焦点的重新锁定来使原来的信息重新保持激活。其典型的理论代表是“基于时间的资源共享模型”(Camos & Barrouillet, 2018)。在阅读的老化相关研究中已经发现，老年人在阅读中会进行大量的回视，可能是老年读者工作记忆能力下降之后，为了进行有效阅读加工而采取的更多注意焦点重新锁定的过程。这反映了老年读者在阅读过程中可能会对信息输入进行自我调节，更频繁地停

下来进行概念整合，才能有效利用上文进行预测加工(Stine-Morrow et al., 2010)。但值得注意的是最新研究表明汉语阅读的语义整合并不能单纯用工作记忆的下降来解释(Zhu et al., 2019)。由此可见，工作记忆负荷的增加究竟会怎样影响老年人和青年人在阅读中的预测加工机制，目前还没有稳定的结论。

因此，当前实验在研究一材料基础上，采用掩蔽文本范式，在掩蔽条件下读者看过的内容会被※掩蔽从而阻碍注意焦点的重新锁定、增加工作记忆负荷，采用眼动脑电联合记录的方法，考察以下问题：(1)工作记忆负荷是否会对老年人和青年人的预测性效应产生影响？(2)工作记忆负荷是否会对老年人和青年人预测误差成本的产生造成影响？图 2 为实验条件设置示意图。

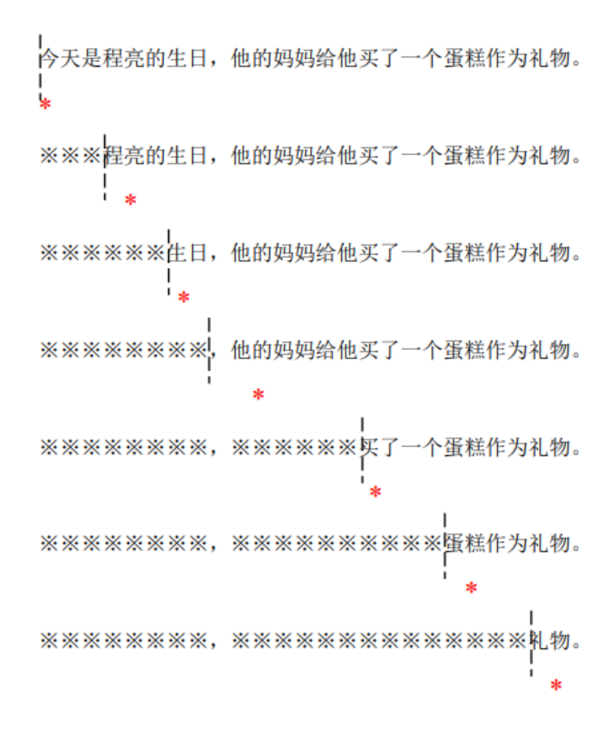


图 2 实验 2 工作记忆负荷增大条件设置示意图

注：图中*号代表注视点位置，虚线代表不可见边界，当注视点越过边界时，在工作记忆负荷增大的条件下，被试之前看过的内容就会被※号掩蔽，在回视过程中也不会重新出现汉字。

对所有被试进行视觉能力、教育背景、近期阅读经验、加工速度、工作记忆、抑制能力、词汇能力的测试和记录，确保被试组内的同质性。在最后一项研究中会将所有测试分数作为协变量纳入模型进行分析。

假设：(1)如果存在工作记忆负荷对预测性加工的影响，在高工作记忆负荷条件下青年人和老年人会表现出比正常工作记忆负荷更大的预测性效应差异，表现为青年人预测性效应更小而老年预测性效应更大；(2)如果工作记忆负荷增大会导致老年人和青年人不同条件下预测误差成本的变化，青年人在低工作记忆负荷条件下不存在预测误差成本，在高工作记忆负荷下存在；老年人在两种记忆负荷下均表现出预测误差成本，在高工作记忆负荷下表现出

更大的预测误差成本。

3.2.3 实验 3：不同语言能力的老年人和青年人预测误差成本的差异

相关研究证明，在成人期习惯性地与文本接触，有更多的文本阅读经验，也可能增加知识，可缓冲老化带来的影响。语言能力随年龄老化产生的增长可以有效增强语言加工(Liu et al., 2019; Salthouse & Timothy, 2012)。在语言加工中，语言能力(阅读水平)和预测能力的关系密切，读写或语言能力可以调节语言的预测加工，相关研究对比了不同的被试群体如高低读写能力者，儿童、阅读障碍成人和大学生等的预测加工能力，结果显示有阅读障碍的成人比正常成人表现出较差的预测加工(Huettig & Brouwer, 2015)。最新研究表明，词汇量更高的老年人在语言处理能力上表现得更像青年人，说明词汇量起到了一定的补偿作用(Xu et al., 2020)。

老年人具有更丰富的阅读经验和不断积累的晶体智力是不争的事实。但是他们积累的语言能力在老年人的预测加工机制的变化中起到了怎样的作用，这仍是未解决的问题。因此，当前实验采用研究一的材料，根据言语智力分数将被试进行高低分组，采用眼动脑电联合记录的方法，考察不同语言能力的老年人和青年人的预测误差成本是否存在差异，探讨语言能力的保留对预测加工机制的影响。

对所有被试词汇能力以外的视觉能力、教育背景、近期阅读经验、加工速度、工作记忆、抑制能力的测试和记录，确保被试组内的同质性。在最后一项研究中会将所有测试分数作为协变量纳入模型进行分析。

假设：如果语言能力对于老年人的预测加工有影响，那么语言能力低分组老年人会表现出比高分组老年人更大的预测性效应，表现为加工低预测词存在更大困难，且表现出比高分组老年人更大的预测误差成本。但即便是语言能力分数更高的老年人比起青年人，仍然存在更大的预测性效应，出现预测误差成本。

3.3 研究三：数据挖掘整合，构建老年人汉语阅读预测加工模型

语言是人类最复杂的心理行为之一，在语言理解方面研究者关心其心理过程如何、与基础的认知成分的关系是什么以及与认知系统的关系是什么。解释非特异性因素对语言能力老化的影响，主要有三种理论：加工速度理论认为老年期认知加工速度的减慢引起语言加工过程减慢(Salthouse, 1996)；工作记忆理论认为工作记忆受损解释了年龄增长带来的语言能力损伤(何文广, 2017; de Beni et al., 2007)；抑制缺陷理论认为老年人抑制无关信息的能力下降是语言能力受损的重要原因(Campbell et al., 2020)。吴翰林等(2020)的研究关注语言能力的老化机制，提出非特异性的一般认知能力与非特异性的语言能力在共同作用，组间差异的回归分析表明一般认知能力和语言能力都会对老年和青年的组间差异有显著贡献，而且一般认知能力贡献更大。

研究二聚焦于汉语阅读预测加工机制，主要操纵了三种因素，探讨了视觉生理、工作记忆以及语言能力对预测加工机制随年龄增长产生变化的影响。视觉能力下降可能导致老年人

无法对即将出现的刺激做出很好的加工，这意味着如果他们采用等级扩散激活就很有可能无法利用预视信息去抑制其他已经激活的选项；工作记忆能力下降导致老年人要不断回视以重新聚焦注意焦点，如果进行等级扩散激活就会增大他们的工作记忆负担；而语言能力的保留让老年人仍然有可能进行预测加工。多方面因素共同导致了老年人存在预测性效应且存在预测误差成本，采用了效率相对较低但是更为稳妥的全或无的预测加工方式。

但是，为了更好、更全面地考察其他因素可能产生的影响，在所有研究之前都进行视觉能力(中央凹视敏度测验)、教育背景、近期的阅读经验、加工速度(数字和颜色命名任务)、工作记忆(数字顺背和倒背)、抑制能力(STROOP 任务)、词汇能力(韦氏智力量表词汇分测验)的测试。在最后一项研究中会将所有测试分数作为协变量纳入模型进行分析。诚然，老化包含了非常复杂的、以多种方式互相影响的因素，要建立老年人汉语阅读预测加工模型，必须对多方面的因素进行综合考虑。以上因素起作用的权重多大？产生作用的时间进程是怎样的？老年人群中巨大的个体差异在其中起到了怎样的作用？目前这些问题都没有明确的答案。因此，研究三将以上因素作为协变量纳入混合线性模型进行拟合，通过数据挖掘的手段考察以上因素在影响老年人阅读预测加工认知机制上作用的权重；采用生存分析考察以上因素以何种方式在预测加工的不同阶段发挥作用；采用分布分析考察老年人的个体差异所产生的影响。

假设：如果以上因素以共同方式而非独立方式起作用，那么将其同时纳入模型的拟合度要优于单独纳入模型；如果以上因素起作用的时间进程不同，那么生存分析中将表现出不同的分离点；如果老年人的个体差异存在影响，那么在分布分析中则不会在位置参数上表现出差异，而会在延长参数上表现出显著差异。

4 理论建构与创新

要考察老年期阅读行为的变化及其潜在认知机制变化，仅通过改变目前已有的眼动控制模型中的参数来进行模拟远远不够(McGowan & Reichle, 2018; Rayner et al., 2006; Rayner et al., 2013)。目前已有的阅读模型认为，读者将自己的经验知识结合当前语境对即将出现的信息进行预测和提前激活是有效的语言处理中极其重要的部分(McGowan & Reichle, 2018; Li & Pollatsek, 2020)。当前研究在此基础上提出研究核心在于：通过考察老年人阅读中是否出现预测误差成本，判断老年人阅读中的预测加工机制是否产生了变化。研究拟采用眼动脑电同步记录技术，聚焦老年人预测误差成本的产生机制，从副中央凹视觉加工、工作记忆负荷及语言能力三方面考察老年人的阅读加工机制产生动态变化的原因。根据已有研究和当前研究计划的预期成果，拟构建汉语阅读中预测加工随年龄变化的机制模型，如图 3 所示。

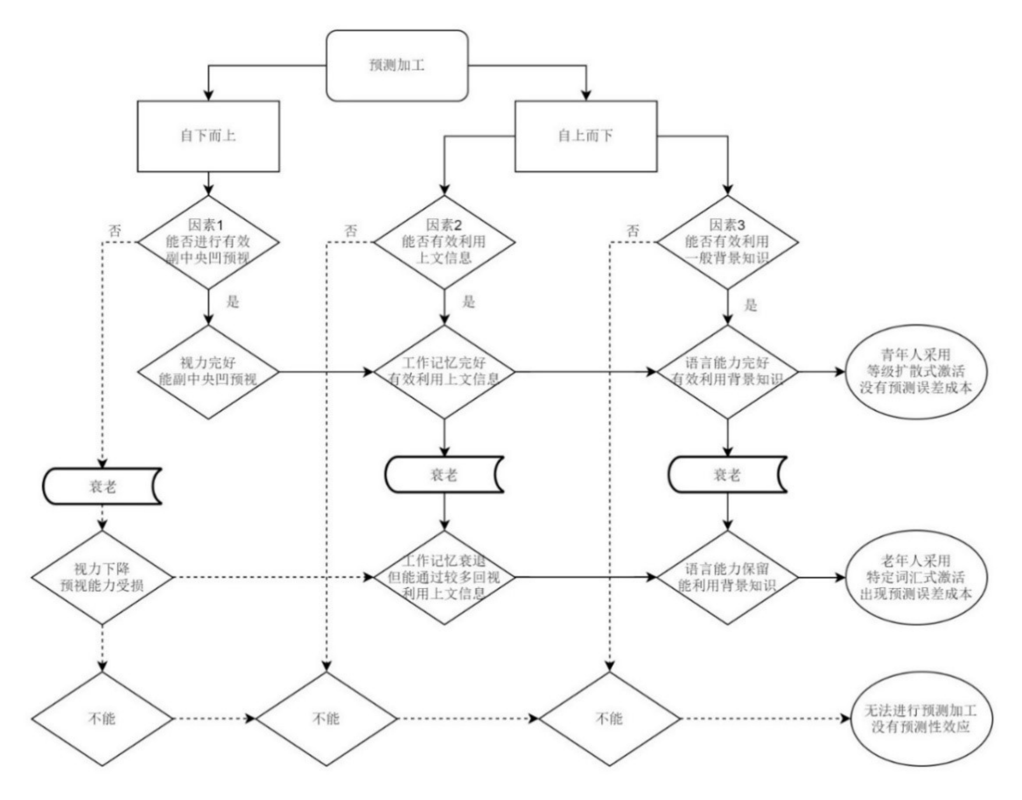


图 3 汉语阅读中预测加工随年龄变化的机制模型

当前研究的创新性主要表现为：

第一，聚焦汉语阅读中与老化相关的高水平信息加工机制，采用眼动脑电同步记录方式，既为阅读中的眼动行为提供了更多的脑神经生理的证据，又采用了更具有生态效度符合正常阅读习惯的方式来探索阅读中的脑电变化。在自然条件下考察阅读的认知加工机制是否随年龄老化发生了质变这一关键问题，探讨阅读加工过程神经机制，处于阅读能力毕生发展研究前沿；

第二，创造性地提出要解决这一关键问题需要从老年人阅读中的预测误差成本入手，并进一步从老年人的副中央凹视觉加工、工作记忆整合能力和语言能力三个方面考察阅读认知机制产生动态变化的原因，具有较好的创新性和开拓性。

第三，新颖地采用数据挖掘技术，采用多协变量拟合、生存分析和分布分析，提出老年期视觉能力、工作记忆能力的下降与语言能力的保留共同作用的方式及其时间进程，并探讨了老年人个体差异产生的影响，构建汉语阅读毕生发展模型，最终为提高中国老年人阅读效率，提升其精神文化生活水平，有效应对老龄化提供参考依据。

参考文献

白学军，曹玉肖，顾俊娟，郭志英，闫国利. (2011). 可预测性和空格对中文阅读影响的眼动研究. *心理科学, 34*(6), 1282–1288.

白学军，李馨，闫国利. (2015). 汉语阅读眼动控制：20 年研究的总结. *心理发展与教育, 31*(1), 85–91.

白学军，闫国利. (2017). *阅读心理学*. 上海：华东师范大学出版社.

国家统计局. (2020). 中华人民共和国 2019 年国民经济和社会发展统计公报. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228_1728913.html.

何文广. (2017). 语言认知老化机制及其神经基础. *心理科学进展, 25*(9), 1479–1491.

李诸洋，刘璐. (2017). 眼动与脑电同步记录技术在心理语言学研究中的新进展. *心理科学, 40*(4), 850–855.

刘志方，仝文，张骏. (2019). 中文阅读中词汇加工的年老化：眼动证据. *心理发展与教育, 35*(6), 665–677.

苏衡，刘志方，曹立人. (2016). 中文阅读预视加工中的词频和预测性效应及其对词切分的启示：基于眼动的证据. *心理学报, 48*(6), 625–636.

杨玉芳. (2015). *心理语言学*. 北京：科学出版社.

王敬欣，徐倩倩，郝立莎，张雪. (2020). 汉字间空格大小对青年人和老年人阅读的影响：眼动研究. *心理科学, 43*(1), 68–74.

吴翰林，于宙，王雪娇，张清芳. (2020). 语言能力的老化机制：语言特异性与非特异性因素的共同作用. *心理学报, 52*(5), 541–561.

Baccino, T. (2011). Eye movements and concurrent event-related potentials': Eye fixation-related potential investigations in reading. In S. P. Liversedge, I. D. Gilchrist, & S. Everling (Eds.), *The Oxford handbook of eye movements* (pp. 857–870). Oxford: Oxford University Press.

Balota, D. A., Pollatsek, A., & Rayner, K. (1985). The interaction of contextual constraints and parafoveal visual information in reading. *Cognitive Psychology, 17*(3), 364–390.

Campbell, K. L., Lusting, C., & Hasher, L. (2020). Aging and Inhibition: Introduction to the Special Issue. *Psychology and Aging, 35*(5), 605–631.

Camos, V., & Barrouillet, P. (2018). *Working memory in development*. London: Routledge.

Choi, W., Lowder, M. W., Ferreira, F., Swaab, T. Y., & Henderson, J. M. (2017). Effects of word predictability and preview lexicality on eye movements during reading: A comparison between young and older adults. *Psychology and Aging, 32*(3), 232–242.

Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences, 36*(3), 181–204.

DeLong, K. A., Quante, L., & Kutas, M. (2014). Predictability, plausibility, and two late ERP positivities during written sentence comprehension. *Neuropsychologia, 61*, 150–162.

DeLong, K. A., Troyer, M., & Kutas, M. (2014). Pre-processing in sentence comprehension: Sensitivity to likely upcoming meaning and structure. *Language and Linguistics Compass, 8*(12), 631–645.

de Beni, R., Borella, E., & Carretti, B. (2007). Reading comprehension in aging: The role of working memory, and metacomprehension. *Aging, Neuropsychology, and Cognition, 14*(2), 189–212.

Dimigen, O., Sommer, W., Hohlfeld, A., Jacobs, A. M., & Kliegl, R. (2011). Co-registration of eye movements and EEG in natural reading: Analyses and review. *Journal of Experimental Psychology: General, 140*(4), 552–572.

Ehrlich, S. F., & Rayner, K. (1981). Contextual effects on word perception and eye movements during reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 20*, 641–655.

Federmeier, K. D., & Kutas, M. (2005). Aging in context: Age-related changes in context use during language comprehension. *Psychophysiology, 42*(2), 133–141.

Federmeier, K. D., & Kutas, M, (2019). What's "left"? Hemispheric sensitivity to predictability and congruity during sentence reading by older adults. *Neuropsychologia, 133*, 107–173.

Frisson, S., Harvey, D. R., & Staub, A. (2017). No prediction error cost in reading: Evidence from eye movements. *Journal of Memory and Language, 95*, 200–214.

Janse, E., & Jesse, A. (2014). Working memory affects older adults' use of context in spoken-word recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(9), 1842–1862.

Juhasz, B. J., White, S. J., Liversedge, S. P., & Rayner, K. (2008). Eye movements and the use of parafoveal word length information in reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 34*(6), 1560–1579.

Henderson, J. M., Luke, S. G., Schmidt, J., & Richards, J. E. (2013). Co-registration of eye movements and event-related potentials in connected-text paragraph reading. *Frontiers in Systems Neuroscience, 7*, 28.

Huettig, F., & Brouwer, S. (2015). Delayed anticipatory spoken language processing in adults with dyslexia—Evidence from eye-tracking. *Dyslexia*, *21*(2), 97–122.

Huettig, F., & Janse, E. (2016). Individual differences in working memory and processing speed predict anticipatory spoken language processing in the visual world. *Language, Cognition and Neuroscience*, *31*(1), 80–93.

Kliegl, R., Grabner, E., Rolfs, M., & Engbert, R. (2004). Length, frequency, and predictability effects of words on

eye movements in reading. *European Journal of Cognitive Psychology, 16*(1-2), 262–284.

Kretzschmar, F., Schlesewsky, M., & Staub, A. (2015). Dissociating word frequency and predictability effects in reading: Evidence from coregistration of eye movements and EEG. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, *41*(6), 1648–1662.

Kuperberg, G. R., Jaeger, T. F., Hospital, M. G., & Sciences, C. (2016). What do we mean by prediction in language comprehension? *Language Cognition Neuroscience*, *31*(1), 32–59.

Kutas, M., Smith, N. J., & DeLong, K. A. (2011). A look around at what lies ahead: Prediction and predictability in language processing. In M. Bar (Ed.), *Predictions in the brain: Using our past to generate a future* (pp. 190–207). Oxford: Oxford University Press.

Laubrock, J., Kliegl, R., Engbert, R.(2006). SWIFT explorations of age differences in eye movements during reading. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 30*(6), 872–884.

Levy, R. (2008). Expectation-based syntactic comprehension. *Cognition, 106*(3), 1126–1177.

Li, L., Li, S., Xie, F., Chang, M., McGowan, V. A., & Wang, J., et al. (2019). Establishing a role for the visual complexity of linguistic stimuli in age-related reading difficulty: Evidence from eye movements during Chinese reading. *Attention, Perception, & Psychophysics, 81*(8), 2626–2634.

Li, S., Li, L., Wang, J., McGowan, V. A., & Paterson, K. B. (2018). Effects of word length on eye guidance differ for young and older Chinese readers. *Psychology and Aging, 33*(4), 685–692.

Li, X., & Pollatsek, A. (2020). An integrated model of word processing and eye-movement control during Chinese reading. *Psychological Review, 127*(6), 1139–1162.

Liu, X., Stine-Morrow, E. A. L., & McCall, G. S. (2019). The role of print exposure in supporting cognitive ability among older adults. *Innovation in Aging, 3,* (S1).651.

Luke, S. G., & Christianson, K. (2016). Limits on lexical prediction during reading. *Cognitive Psychology, 88*, 22–60.

McGowan, V. A., & Reichle, E. D. (2018). The “risky” reading strategy revisited: New simulations using E-Z Reader. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 71*(1), 179–189.

Norris, D. (2006). The Bayesian Reader: Explaining word recognition as an optimal Bayesian decision process. *Psychological Review, 113*(2), 327–357.

Owsley, C. (2016). Vision and Aging. *Annual Review of Vision Science*, *2*, 255–271.

Parker, A. J., Kirkby, J. A., & Slattery, T. J. (2017). Predictability effects during reading in the absence of parafoveal preview. *Journal of Cognitive Psychology (Hove, England), 29*(8), 902–911.

Payne, B. R., Federmeier, K. D. (2018). Contextual constraints on lexico-semantic processing in aging: Evidence from single-word event-related brain potentials. *Brain Research, 1687*, 117–128.

Rayner, K. (1975). Parafoveal identification during a fixation in reading. *Acta Psychologica, 39*(4), 271–281.

Rayner, K., Li, X., Juhasz, B. J., & Yan, G. (2005). The effect of word predictability on the eye movements of Chinese readers. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*(6), 1089–1093.

Rayner, K., Reichle, E. D., Stroud, M. J., Williams, C. C., & Pollatsek, A. (2006). The effect of word frequency, word predictability, and font difficulty on the eye movements of young and older readers. *Psychology and Aging, 21*(3), 448–465.

Rayner, K., & Well, A. D. (1996). Effects of contextual constraint on eye movements in reading: a further examination. *Psychonomic Bulletin & Review, 3*(4), 504–509.

Rayner, K., Yang, J., Schuett, S., & Slattery, T. J. (2013). Eye movements of older and younger readers when reading unspaced text. *Experimental Psychology, 26*(1), 354–361.

Salthouse. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review, 103*(3), 403–428.

Salthouse, & Timothy. (2012). Consequences of age-related cognitive declines. *Annual Review of Psychology, 63*(1), 201–226.

Schotter, E.R., Lee, M., Reiderman, M., & Rayner, K. (2015). The effect of contextual constraint on parafoveal processing in reading. *Journal of Memory and Language, 83*, 118–139.

Schotter, E. R., Reichle, E. D., & Rayner, K. (2014). Rethinking parafoveal processing in reading: Serial-attention models can explain semantic preview benefit and N+2 preview effects. *Visual Cognition, 22*(3-4), 309–333.

Schuster, S., Himmelstoss, N. A., Hutzler, F., Richlan, F., & Hawelka, S. (2021). Cloze enough? hemodynamic effects of predictive processing during natural reading. *NeuroImage, 228*, 117687.

Sereno, S. C., & Rayner, K. (2003). Measuring word recognition in reading: eye movements and event-related potentials. *Trends in Cognitive Sciences, 7*(11), 489–493.

Staub, A. (2015). The effect of lexical predictability on eye movements in reading: Critical review and theoretical interpretation. *Language and Linguistics Compass*, *9*(8), 311–327.

Stine-Morrow, E. A. L., Shake, M. C., Miles, J. R., Lee, K., Gao, X., & McConkie, G. (2010). Pay now or pay later: Aging and the role of boundary salience in self-regulation of conceptual integration in sentence processing. *Psychology and Aging, 25*(1), 168–176.

Taylor, W. L. (1953). “Cloze procedure”: A new tool for measuring readability. *Journalism Bulletin*, *30*(4),

415–433.

Wang, J., Li, L., Li, S., Xie, F., Chang, M., Paterson, K.B., White, S.J., & McGowan, V.A. (2019). Adult age differences in eye movements during reading: The evidence from Chinese. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences, 73*(4), 584–593.

Wang, J., Li, L., Li, S., Xie, F., Liversedge, S.P., & Paterson, K.B. (2019). Effects of aging and text-stimulus quality on the word-frequency effect during Chinese reading. *Psychology and Aging*, *33*(4), 692–712.

Warrington, K. L., McGowan, V. A., Paterson, K. B., & White, S. J. (2019). Effects of adult aging on letter position coding in reading: Evidence from eye movements. *Psychology and Aging, 34*(4), 598–612.

White, S. J., Rayner, K., & Liversedge, S. P. (2005). The influence of parafoveal word length and contextual constraint on fixation durations and word skipping in reading. *Psychonomic Bulletin & Review, 12*(3), 466–471.

Whitford, V., & Titone, D. (2017). The effects of word frequency and word predictability during first-and second-language paragraph reading in bilingual older and younger adults. *Psychology and Aging, 32*(2), 158–177.

Willems, R. M., Frank, S. L., Nijhof, A. D., Peter, H., & Antal, V. D. B. (2016). Prediction during natural language comprehension. *Cerebral Cortex, 26*(6). 2506–2516.

Wlotko, E. W., & Federmeier, K. D. (2012). Age-related changes in the impact of contextual strength on multiple aspects of sentence comprehension. *Psychophysiology, 49*(6), 770–785.

Xu, N., Chen, S., Yang, Y., Zhu, Z. (2020). Increased world knowledge in older adults does not prevent decline in world knowledge comprehension: An ERP study. *Brain and Cognition.* 140:105534.

Yao, P., Staub, A., & Li, X. (in press). Predictability eliminates neighborhood effects during Chinese sentence reading. *Psychonomic Bulletin & Review.*

Zang, C., Zhang, M., Bai, X., Yan, G., Paterson, K.B., & Liversedge, S.P. (2016). Effects of word frequency and visual complexity on eye movements of young and older Chinese readers. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 69*(7), 1409–1425.

Zhao, S., Li, L., Chang, M., Wang, J., & Paterson, K. B. (2021). A further look at ageing and word predictability effects in Chinese reading: Evidence from one-character words. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 74*(1), 68–76.

Zhao, S., Li, L., Chang, M., Xu, Q., Zhang, K., Wang, J., & Paterson, K. B. (2019). Older adults make greater use of word predictability in Chinese reading. *Psychology and Aging, 34*(4), 780–790.

Zhu, Z., Wang, S., Xu, N., Li, M., & Yang, Y. (2019). Semantic integration declines independently of working memory in aging. *Applied Psycholinguistics, 40*(6), 1481–1494.

Understanding mechanisms of prediction error cost in Chinese reading for older adults

LI Lin, ZHAO Sainan, ZHANG Lijuan, WANG Jingxin

(Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education, Academy of Psychology and Behavior, Tianjin Normal University, Tianjin 300387)

(Faculty of Psychology, Tianjin Normal University, Tianjin 300387)

(Center of Collaborative Innovation for Assessment and Promotion of Mental Health, Tianjin 300387)

Abstract: An important question for research on reading across the lifespan concerns whether mechanisms of cognitive processing undergo only quantitative changes or also qualitative changes with aging. To process written language effectively, readers use their existing knowledge to make predictive inferences about linguistic information. As Older adults appear to rely more heavily on lexical prediction during reading. However, it is currently unknown whether, like young adults, they experience a processing cost due to predictive error, and whether the magnitude of this cost differs across age adult groups. Accordingly, the present research aims to understand the processing consequence of predictive error in both young and older adults. This will be achieved using novel co-registration methods that synchronize the recording of electroencephalographic (EEG) signals with eye movements. In particular, this approach will enable the analysis of fixated-related potentials (FRPs), which are averaged EEG waveforms time-locked to a fixation on a target word in a sentence during normal reading. Study 1 will manipulate the degree to which the prior linguistic constrains the probable identity of a word, to investigate age differences (young versus older adults) in predication error cost on word recognition in reading. Study 2, the parafoveal information availability, working memory load and the language ability will be manipulated to investigate the why the older adults produce prediction error cost. Study 3 will use linear mixed-effects modelling, and data-mining methods, to assess the effects of aging and these key individual differences variables on the effects of contextual constraint in reading (using data from Study 1 and 2). The findings from these studies will provide important insights into the nature of aging and individual difference effects on neural and cognitive mechanisms underlying word prediction in reading, and will form the basis for future models of these effects in Chinese reading.

Key words: contextual effects, prediction error cost, Chinese reading, aging effects, co-registration of eye movements and EEG